

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**В. М. ГАРЯЖА, В. Г. ВОРОПАЙ, Є. Д. ДЬЯКОВ**

**Конспект лекцій  
з курсу**

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**Розділ  
«ЕЛЕКТРИЧНА ІЗОЛЯЦІЯ»**

*(для студентів 2-3 курсів денної та заочної форм навчання  
напрямів підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології,  
6.050702 – Електромеханіка та слухачів другої вищої освіти)*

**ХАРКІВ – ХНУМГ – 2015**

**Гаряжа В. М.** Конспект лекцій з курсу «Електротехнічні матеріали». Розділ «Електрична ізоляція» (для студентів 2-3 курсів денної та заочної форм навчання напрямів підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, 6.050702 – Електромеханіка та слухачів другої вищої освіти) / В. М. Гаряжа, В. Г. Воропай, Є. Д. Дьяков; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2015. – 43 с.

Автори: В. М. Гаряжа  
В. Г. Воропай  
Є. Д. Дьяков

Рецензент : доц., канд. техн. наук Ю. П. Кравченко

Рекомендовано кафедрою Електропостачання міст,  
протокол № 6 від 21 липня 2013р.

© В. М. Гаряжа, В. Г. Воропай, Є. Д. Дьяков, 2015  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	4
1. Причини пошкоджень електричної ізоляції .....	4
1.1 Температурні режими роботи ізоляції .....	5
1.2 Електричні впливи .....	8
1.3 Механічні дії .....	12
1.4 Вплив навколишнього середовища .....	13
2. Основні визначення теорії надійності.....	14
2.1 Терміни та визначення, що характеризують стан обладнання .....	19
2.2 Дефекти, пошкодження, відмови устаткування .....	20
2.3 Тимчасові поняття .....	22
2.4 Показники надійності .....	22
2.5 Комплексні показники надійності .....	23
2.6. Нормування надійності .....	24
2.7. Забезпечення, визначення та контроль надійності .....	24
2.8. Випробування на надійність .....	25
3. Рівняння «кривий життя» електричної ізоляції .....	25
4. Розрахунок часу до відмови твердої ізоляції .....	28
5. Умови безвідмовної роботи ізоляцій.....	29
Література.....	42

## Вступ

Умови, в яких доводиться працювати електричній ізоляції останнім часом стали більш жорсткими. Пов'язано це не тільки з розробкою і впровадженням нового електротехнічного обладнання, яке має вищі електричні характеристики, але також і з більш високими вимогами, що пред'являються до експлуатацією цього обладнання. Разом з цим підвищуються вимоги до надійності роботи обладнання, котра значною мірою залежить від роботи електричної ізоляції. Для забезпечення цих вимог необхідно мати інформацію про фізичні процеси, які протікають в електричній ізоляції під впливом електромагнітного поля, а також про параметри, за допомогою яких можна оцінити надійність їх роботи.

### 1. Причини пошкоджень електричної ізоляції

Електроізоляційні матеріали, що застосовуються в електроенергетиці, піддаються різним впливам. Заводи - виробники гарантують зберігання основних характеристик електроізоляційних матеріалів протягом усього терміну служби, але при дотриманні умов зберігання, транспортування, виробництва, монтажу та експлуатації електротехнічного виробу. Виконати ці умови досить складно, тому що на кожній з вказаних стадій можливі різні впливи, які призводять до виникнення дефектів в електричній ізоляції. Характер впливів і їх поєднання, як правило, мають випадковий характер, що ускладнює врахування їх впливу при прогнозуванні терміну служби виробу. Найбільш просто врахувати вплив постійних впливів, які не змінюються в часі, а також змінних впливів, що мають чітку функціональну залежність від часу.

В [1] наведено перелік факторів впливу, що впливають на режими роботи ізоляції електрообладнання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Перелік деяких факторів впливу на електричну ізоляцію електрообладнання

№ п / п	Найменування
1	2
Термічні	
1	максимальна температура
2	низька (висока) навколишня температура
3	температурний градієнт
4	швидкість зміни температури (тепловий удар)
Електричні	
1	робоча напруга
2	перенапруги (перехідні процеси)
3	частота
4	часткові розряди
5	струмопровідні містки
6	струми витоку по поверхні

1	2
Механічні	
1	вібрація
2	удар електромеханічний
3	вигин, тиск, розтягнення, стиснення, кручення
4	термомеханічні навантаження
Режими роботи	
1	тривалий
2	переривчастий
3	короткочасний
4	транспортування, зберігання
Навколишнє середовище	
1	вологість
2	наявність кисню, азоту, водню
3	наявність агресивних газових середовищ, які викликають корозію
4	пил, пісок, цвіль
5	ізоляційні рідини
6	ультрафіолетове, інфрачервоне, видиме випромінювання

Розглянемо основні фактори, які впливають на термін служби електричної ізоляції.

### 1.1 Температурні режими роботи ізоляції

Переважаючим фактором, який впливає на старіння електричної ізоляції, є температура. Для оцінки стійкості електричної ізоляції електротехнічних виробів до впливу температури прийняті класи нагрівостійкості. Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 8865-93 «Системи електричної ізоляції. Оцінка нагрівостійкості і класифікація» дев'ять класів нагрівостійкості охоплюють діапазон температур від 90°C до 250°C (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів

Позначення класу нагрівостійкості	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Температура, °C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Температура класів нагрівостійкості, значення якої перевищує 250°C, збільшується з інтервалом 25°C.

Наведені класи нагрівостійкості вказують максимальну робочу температуру конкретного виробу за нормальних умов його роботи. Відповідно ізоляція, що використовується в цьому обладнанні, повинна мати нагрівостійкість не меншу температури, яка відповідає класу нагрівостійкості електротехнічного виробу. Слід враховувати, що в електротехнічних виробках, як правило, використовується декілька різних електроізоляційних матеріалів. Нагрівостійкість

окремих матеріалів, що входять в систему ізоляції, може не відповідати нагрівостійкості самої системи.

Для визначення сумісності матеріалів у системі ізоляції та встановлення максимальної робочої температури для всієї системи проводяться функціональні випробування виробу.

Слід розрізняти фактичну температуру ізоляції і перевищення температури електротехнічного виробу. Наведені в [2] значення температури є фактичною температурою ізоляції, але не перевищенням температури електротехнічного виробу. При розробці конкретного виробу враховуються умови експлуатації, характеристики навантаження, методи вентиляції і т.п. Тому в нормативних документах на даний виріб, як правило, вказують величину перевищення температури, а не фактичну температуру.

В процесі експлуатації в електротехнічних výroбах характеристики нагрівостійкості окремих матеріалів можуть змінюватися в залежності від їх комбінації.

Нагрівостійкість ізоляції в конкретних електротехнічних výroбах також залежить від функцій, покладених на них.

Загальноприйнятою основою оцінки нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів є випробування. Однак, при використанні результатів випробувань необхідно бути впевненим, що вони проводились за умов, котрі відповідають експлуатаційним для даного виробу.

При оцінці нагрівостійкості систем ізоляції слід також враховувати досвід експлуатації. За відсутністю такого досвіду в [2] рекомендується провести відповідні функціональні випробування. Для цього необхідно мати випробувану на практиці систему, яку слід використовувати як еталонну систему ізоляції.

При тривалому впливі підвищеної температури в результаті хімічних процесів, що повільно протікають, відбуваються незворотні зміни ізоляційних матеріалів. Даний процес отримав назву «теплове старіння ізоляції». Швидкість теплового старіння багатьох ізоляційних матеріалів помітно зростає при підвищенні температури, що відповідає теорії Арреніуса-Ейрінга про температурні зміни швидкості хімічних реакцій.

В 1889 році Арреніус опублікував рівняння, яке виражає залежність швидкості хімічної реакції  $k$  від температури  $T$ :

$$k = A \exp (-E / RT), \quad (1.1)$$

де  $E$  – енергія активації;  $R$  – газова постійна.

Відповідно до закону Арреніуса термін служби  $E$  (років) будь-якого ізоляційного матеріалу визначається виразом

$$E = C \cdot e^{A - \frac{B}{T}}, \quad (1.2)$$

де  $C$  – 1 рік;  $A$  і  $B$  – постійні, що встановлюються експериментально для досліджуваного матеріалу, причому  $A$  – безрозмірна величина,  $B$  вимірюється в градусах Кельвіна;  $T$  – термодинамічна температура, К.

У 1930 році Монтзінгер узагальнивши результати власних досліджень і дані, отримані іншими авторами, запропонував просте правило для визначення терміну служби ізоляції класу  $A$ , яке отримало назву «правило восьми граду-

сів». Відповідно до нього при цілком певному незмінному підвищенні температури термін служби зменшується в два рази. Формула для визначення терміну служби має вигляд

$$D_{\vartheta} = A_0 \cdot 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta}, \quad (1.3)$$

де  $D_{\vartheta}$  – термін служби при незмінній температурі;

$A_0$  – термін служби при температурі  $0^{\circ}\text{C}$ .

Якщо прийняти значення  $\Delta\vartheta = 8^{\circ}\text{C}$ , то формула (1.3) матиме вигляд

$$D_{\vartheta} = A_0 \cdot 2^{-\vartheta/8} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{8} \vartheta} = A_0 \cdot e^{-0,0866 \cdot \vartheta} \quad (1.4)$$

Зв'язок між терміном служби і робочою температурою ізоляції має логарифмічний характер. Якщо по одній осі відкладати температуру в лінійному масштабі, а по іншій - термін служби в логарифмічному масштабі, то залежність набере вигляд прямої (рис. 1.1).

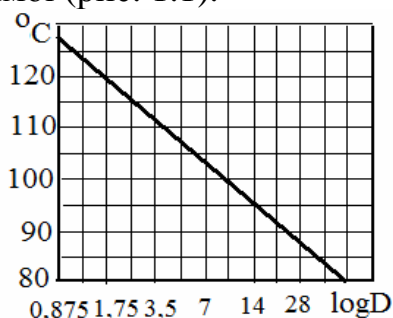


Рисунок 1.1 – Залежність терміну служби ізоляції від температури

Використовуючи це правило можна також оцінити вплив короточасних перевантажень, які мають місце, наприклад, при аварійних режимах, на термін служби ізоляції. Якщо температура протягом аварійного режиму змінюється, то відносне зношення у відсотках можна визначити за формулою

$$V_1 = 100 \int_0^t \frac{dt}{D_{\vartheta}} \quad (1.5)$$

Проте, слід пам'ятати, що  $8^{\circ}\text{C}$  – це середнє значення. Є рекомендації вибирати значення температури з діапазону  $6-12^{\circ}\text{C}$ . Наприклад, вивчення процесу старіння кремнійорганічних смол при температурах  $200-250^{\circ}\text{C}$ , показали, що значення  $\Delta\vartheta$  в рівнянні Монтзінгера слід вибирати рівним  $10^{\circ}\text{C}$ .

Крім того, дане правило не слід застосовувати для температур  $90^{\circ}\text{C}$  і нижче, тому що старіння ізоляції за цих умов відбувається не через хімічні зміни речовини, а з інших причин, наприклад, механічних руйнувань внаслідок вібрації.

Таким чином, правило Монтзінгера не слід розглядати як універсальний закон, оскільки він не дозволяє врахувати різноманіття чинників, які впливають на старіння ізоляції. Однак це не обмежує практичного значення даного правила. Для зменшення похибки у визначенні терміну служби слід використовувати дані статистичної обробки результатів експериментів.

Міжнародною електротехнічною комісією розроблено так зване «правило шести градусів», відповідно до якого зменшення терміну служби ізоляції в

два рази відбувається при збільшенні температури на кожні 6°C. Чим вищий клас ізоляції, тим повільніше відбувається старіння при даній температурі. Так для твердих ізоляційних матеріалів класу В і для трансформаторного масла термін служби ізоляції скорочується в два рази при підвищенні температури на 10°C, а для матеріалів класу Н – на 12°C.

## 1.2 Електричні впливи

В процесі експлуатації на електроізоляційні матеріали впливають робоча напруга і перенапруги, які можуть мати місце в результаті перехідних процесів і при аварійних режимах роботи електрообладнання. У [3] наведені класи напруги електрообладнання і вимоги до електричної міцності ізоляції.

Величини допустимих напруг в мережах 1-35 кВ встановлені виходячи з роботи мережі як з заземленою, так і з ізольованою нейтраллю. Для класів напруг від 110 до 750 кВ нейтраль електричної мережі повинна бути заземлена (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Класи напруги електрообладнання.

Клас напруги електроустаткування, кВ	Найбільша робоча напруга елек- трообладнання, кВ	Номинальна напруга електричної мережі, кВ	Найбільша довго- тривало допустима робоча напруга в електричній мережі, кВ
1	1,1	1,0	1,1
3	3,6	3,0 3,15 3,3	3,5 3,5 3,6
6	7,2	6,0 6,6	6,9 7,2
10	12,0	10,0 11,0	11,5 12,0
15	17,5	13,8 15,0	15,2 17,5
20	24,0	18,0 20,0 22,0	19,8 23,0 24,0
35	40,5	35,0	40,5
110	126,0	110,0	126,0
150	172,0	150,0	172,0
220	252,0	220,0	252,0
330	363,0	330,0	363,0
500	525,0	500,0	525,0
750	787,0	750,0	787,0



На відміну від робочої напруги перенапруги слід віднести до випадкових впливів. Їх можна розділити на внутрішні і зовнішні. У свою чергу внутрішні перенапруги можна розділити на резонансні і комутаційні.

При резонансних перенапругах на ізоляцію впливає підвищена напруга, яке виникає в результаті резонансу на основній або підвищеній частоті. Прикладом може служити виникнення ферорезонансних перенапруг в мережах 6-10кВ. У мережах з ізолюваною нейтраллю або з дугогасним реактором ферорезонанс може розвиватися як в робочому, так і в аварійних режимах роботи. Залежно від параметрів резонансних контурів ферорезонансні перенапруги можуть виникати на основній частоті, вищих гармоніках і на субгармоніках. Причинами виникнення ферорезонансу може бути:

- робота трансформатора на холостому ході;
- розмикання однієї або двох фаз на первинній стороні трансформатора;
- ємність лінії і індуктивність трансформатора, які складають резонансний контур.

Надійність роботи обладнання істотно залежить від співвідношення електричної міцності ізоляції та рівня комутаційних перенапруг. Узгодження електричної міцності ізоляції з перенапругами, які можуть виникати в процесі експлуатації, отримало назву координації ізоляції.

Комутаційні перенапруги мають місце в процесі комутації електричних кіл, наприклад, вмикання або вимикання ліній, а також в результаті коротких замикань в електричних мережах.

При заземленні однієї з фаз і відсутності дуги напруга між пошкодженими фазами і землею збільшується до лінійної. Тривалість дії лінійних напруг на ізоляцію між фазою і землею залежить від швидкості ліквідації такого режиму.

Коли в місці замикання фази виникає дуговий розряд, величина перенапруги залежить від параметрів мережі та умов гасіння дуги в місці пошкоджень.

Найбільш вірогідними джерелами комутаційних перенапруг є включення або відключення ненавантажених ділянок ліній, а також індуктивних елементів. Також комутаційні перенапруги можуть виникати при аварійних відключеннях ділянок мережі через обрив фаз або при двох- і трифазних коротких замиканнях.

Зовнішні перенапруги виникають в результаті впливу на ізоляцію зовнішніх ЕРС, які виникають або за рахунок атмосферної електрики, або через вплив близько розташованих електричних об'єктів більш високої напруги.

Атмосферні перенапруги виникають в результаті прямого удару блискавки або при розряді блискавки поблизу лінії електропередачі. Тривалість імпульсу атмосферної перенапруги знаходиться в межах 20-80 мкс. У зв'язку з цим для випробувань устаткування використовується стандартний грозовий імпульс з тривалістю переднього фронту імпульсу  $\tau_{\phi} = 1,2 \text{ мкс}$  і тривалістю імпульсу  $\tau_i = 50 \text{ мкс}$  (рис. 1.2).

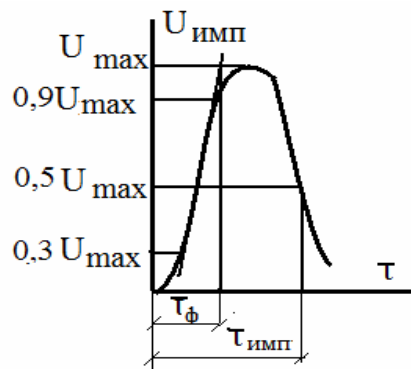


Рисунок 1.2 – Грозний імпульс

На довговічність ізоляції також впливає напруженість електричного поля. При наявності в ізоляції газових включень напруженість електричного поля розподіляється зворотно пропорційно величинам відносної діелектричної проникності газового середовища і матеріалу, який її оточує. Чим більша діелектрична проникність твердого діелектрика, тим вище значення напруженості електричного поля на включенні. Залежно від розмірів порожнин, їх положення, тиску газу, що їх наповнює, величини прикладеної напруги в них виникають так звані часткові розряди. Електрони і іони, які утворюються при часткових розрядах, бомбардують стінки газової порожнини і поступово їх руйнують. Обсяг газової порожнини збільшується, що зменшує електричну міцність твердої ізоляції.

Часткові розряди можуть виникати також і на поверхні матеріалу у вигляді корони або ковзних розрядів.

Один з варіантів твердого діелектрика, що містить газову порожнину, і його еквівалентна схема заміщення представлені на рисунку 1.3 [4].

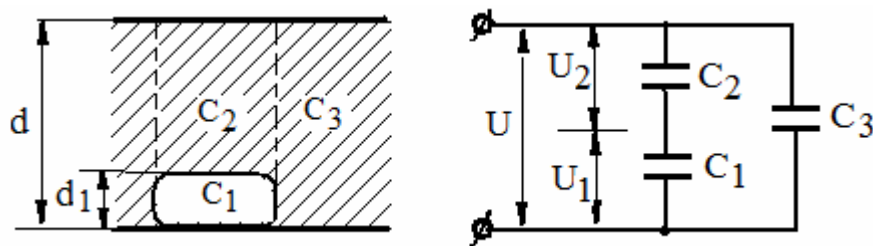


Рисунок 1.3 – Розріз діелектрика з газовою порожниною і його еквівалентна схема

Для наведеної схеми напруга на газовій порожнині дорівнює

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (1.6)$$

де  $U_1$  – напруга на газовій порожнині;  $U$  – напруга, прикладена до діелектрика;  $C_1$  і  $C_2$  – відповідно ємність газового включення і ємність послідовно включеного з ним діелектрика.

Якщо порожнина має форму циліндра, то ємності відповідно рівні

$$C_1 = \frac{\epsilon_o \epsilon_{r1} S_i}{d_1} \quad C_2 = \frac{\epsilon_o \epsilon_{r2} S_i}{d - d_1} \quad (1.7)$$

де  $\epsilon_{r1}$  і  $\epsilon_{r2}$  – відносні діелектричні проникності газової порожнини і твердого діелектрика;  $d_1$  – товщина газової порожнини;  $d_2$  – товщина діелектрика;  $\epsilon_o$  – електрична стала.

Підставивши значення ємностей в (1.6) отримаємо

$$U_1 = U \frac{\epsilon_{r2} \frac{d_1}{d}}{\epsilon_{r1} + (\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}) \frac{d_1}{d}} \quad (1.8)$$

Напруженість електричного поля в газовій порожнини дорівнює

$$E_1 = \bar{E} \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1} + (\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}) \frac{d_1}{d}}, \quad (1.9)$$

де  $\bar{E} = \frac{U}{d}$  – середня напруженість поля в ізоляції при відсутності газового включення.

З цієї формули випливає, що напруженість поля в газовій порожнині буде більшою ніж у твердій ізоляції, так як  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$ . Коли величина цієї напруженості досягне критичного значення, в газовій порожнині виникне розряд. У міру зменшення товщини зазору, електрична міцність газу, що заповнює порожнину зростає. Дана залежність може бути подана у вигляді

$$E_{i0} = 10^5 \exp \frac{46,8}{\ln \frac{d_1}{4 \cdot 10^{-9}}} \quad (1.10)$$

Використовуючи вираз (1.8), напругу пробою газового проміжку представимо у вигляді

$$U_{\div} = E_{i0} \left[ d_1 + \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} (d - d_1) \right] \quad (1.11)$$

Тривалість розряду становить  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  с. Під час розряду відбувається нейтралізація заряду, який накопичився на її поверхні і напруга на газовій порожнині падає практично до нуля. Після припинення розряду, відбувається рекомбінація іонів, і напруга на порожнині знову може досягти критичного значення, при якому виникне новий розряд.

У результаті виникнення розрядів в газовій порожнині температура навколишньої ізоляції підвищується. Максимальна температура буде в зонах миттєвих катода і анода, величина якої може значно перевищувати середнє значення температури, до якої нагріється весь діелектрик.

Різке збільшення провідності газової порожнини при розряді викликає перерозподіл напруженості електричного поля. Максимальне значення напруженості поля переміщується з газової порожнини в твердий діелектрик в район розташування миттєвих катода і анода. Електрони і іони здобувають додаткову кінетичну енергію і бомбардують стінки порожнини, викликаючи їх руйнування. Змінам структури і складу ізоляції сприяють також активні хімічні речовини, що утворюються при розряді, такі як озон, оксиди азоту, атомарний кисень і т.д.

Процес руйнування твердої ізоляції в результаті виникнення в ній часткових розрядів завершується пробоем.

У полімерній ізоляції виникнення часткових розрядів супроводжується деструкцією матеріалу і утворенням гіллястих каналів заповнених газовою сумішшю, які отримали назву електричні дендріди. Дані дендріди є об'ємними дефектами, що руйнують ізоляційний матеріал і зменшують його електричну міцність.

При зволоженні ізоляції під впливом електричного поля утворюються водні дендріди у вигляді скупчення дрібних пор, заповнених водою. Виникнення даних дендрідів не супроводжується частковими розрядами і відбувається при більш низьких значеннях напруженості електричного поля, ніж у електричних дендрідів. Кількість і довжина водних дендрідів зростає в міру збільшення напруженості електричного поля, його частоти і часу витримки матеріалу у вологому середовищі. Електричне старіння полімерної ізоляції протікає до тих пір, поки в кінці водного дендріда не утворюється електричний дендрід, що призведе до пробую матеріалу.

У неорганічних твердих діелектриках під впливом постійного електричного поля можливий процес електролізу. Дендріди, які виникають у вигляді металевих ниток з лужних і лужноземельних металів отримали назву металеві дендріди. У неорганічних стеклах такі дендріди як правило складаються з металевого натрію, який входить до складу стекл.

Виникнення металевих дендрідів призводить до зміни електричного поля в матеріалі, яке стає сильно неоднорідним. У результаті цього зменшується електрична міцність матеріалу, і пробой виникає при меншій напрузі.

### **1.3 Механічні впливи**

Електроізоляційні матеріали піддаються механічним впливам практично протягом усього їхнього терміну служби. За своєю природою механічні впливи на матеріал можна розділити на зовнішні і внутрішні.

Зовнішні механічні дії на ізоляцію можуть виникати на стадіях виробництва, монтажу та експлуатації. Так, наприклад, в кабельних мережах значна кількість дефектів, які потім проявляють себе протягом усього терміну служби, закладається на стадії монтажу. Прокладка кабелю при низьких температурах призводить до зниження пластичних властивостей матеріалів і утворення мікротріщин, які, як правило, не можуть бути виявлені при проведенні приймально-здавальних випробувань.

При поворотах траси в разі різкого перегину кабелю, якщо радіус буде меншим допустимого, на оболонці утворюються гофри і може статися розшару-

вання ізоляції. Надлишкові зусилля під час тягіння кабелю при прокладанні також викликають утворення мікротріщин і надриви ізоляції.

До зовнішніх механічних зусиль слід також віднести вітрові навантаження, навантаження від ожеледі, ваги закріплених на ізоляторах конструкцій і т.д.

До внутрішніх механічних впливів слід віднести механічні напруги, які виникають всередині ізоляційних конструкцій при їх виробництві та експлуатації.

Такі механічні напруги можуть виникати при використанні в конструкції електротехнічного виробу матеріалів з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення. Температурні механічні напруги виникають також при нерівномірному нагріванні чи охолодженні ізоляції або через значний градієнт температур.

На виникнення внутрішніх механічних напруг впливає режим роботи обладнання. Короткочасний режим роботи викликає циклічне нагрівання та охолодження струмопровідних елементів і відповідно їх теплове розширення і стиснення, що безпосередньо відбивається на ізоляції.

#### **1.4 Вплив навколишнього середовища**

Із зовнішніх факторів, що впливають на характеристики ізоляційних матеріалів, особливе місце займає вологість навколишнього середовища. Маючи ряд унікальних властивостей, вода здатна змінити характеристики газоподібних, рідких і твердих діелектриків. Однією з таких властивостей є незначний діаметр молекул води ( $\approx 2,7$  нм). Це дозволяє молекулам води проникати навіть у внутрішньомолекулярні пори ізоляційних матеріалів. Як сильнополярна рідина, у якій значення відносної діелектричної проникності знаходиться в межах 82-85, вода під впливом електричного поля здатна мігрувати в ізоляції на значні відстані, сприяючи утворенню водних дендрідів.

Нерівномірний розподіл води в об'ємі матеріалу призводить до появи локальних електричних полів, що знижує електричну міцність електричної ізоляції.

Особливо помітний вплив вологості навколишнього середовища на електричні характеристики пористих діелектриків, які можуть містити розчинні у воді домішки. При контакті з водою ці домішки утворюють електроліти, які мають високу провідність. Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих ізоляційних матеріалів застосовується їх просочення. Проте, дана технологічна операція не дозволяє повністю перекрити доступ вологи всередину ізоляційного матеріалу. Пояснюється це тим, що діаметр молекул води значно менший діаметра молекул просочувального складу.

У рідких діелектриках наявність води, навіть у незначних кількостях від загального об'єму, різко зменшує електричну міцність. Під впливом електричного поля краплі води поляризуються, набувають форму еліпсоїдів і притягуються між собою різнойменними кінцями, створюючи ланцюжки між електродами з підвищеною провідністю.

Відносна вологість повітря істотно впливає на розряд в повітрі біля поверхні твердого діелектрика, який отримав назву «поверхневий розряд» або «перекриття». Так при підвищенні відносної вологості повітря з 60% до 90% величи-

на розрядної напруги керамічних ізоляторів зменшується практично в два рази [5].

Окрім збільшення електричної провідності і зменшення електричної міцності волога сприяє збільшенню електричної ємності ізоляції і зростанню діелектричних втрат.

При тривалій експлуатації електрообладнання в середовищі з підвищеною вологістю на ізоляції можлива поява цвілі. В результаті цього зменшується питомий поверхневий опір, збільшуються діелектричні втрати і знижуються механічні характеристики ізоляційного матеріалу. Крім того цвіль сприяє розвитку корозії металевих частин, які стикаються з нею.

Таким чином, вологість негативно впливає на характеристики електроізоляційних матеріалів на всіх етапах його існування, що призводить, як правило, до зниження терміну їх служби.

На швидкість старіння ізоляційних матеріалів також впливає збільшення концентрації в навколишньому середовищі кисню, озону, водню або інших хімічних реагентів.

Процес старіння матеріалів прискорюється при впливі на них ультрафіолетового чи інфрачервоного випромінювання, що необхідно враховувати при виборі ізоляційних матеріалів для електрообладнання, що експлуатується на відкритому повітрі.

#### Контрольні питання

1. Перелічіть електричні параметри, які впливають на характеристики електричної ізоляції.
2. Перерахуйте механічні параметри, які впливають на характеристики електричної ізоляції.
3. Назвіть класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів і вкажіть діапазони температур, які вони охоплюють.
4. Поясніть відмінність між фактичною температурою ізоляції та перевищенням температури електротехнічного виробу.
5. Поясніть, що розуміється під терміном «теплове старіння ізоляції».
6. Перерахуйте класи напруги електрообладнання.
7. Поясніть, що розуміється під терміном «координація ізоляції».
8. Назвіть види дендрідів, які зустрічаються в електричній ізоляції.
9. Назвіть зовнішні фактори, які впливають на характеристики електричної ізоляції.
10. Перерахуйте параметри, які можуть змінюватися при підвищенні вологості ізоляційного матеріалу.

## 2. Основні визначення теорії надійності

Основні терміни та визначення понять, які рекомендовано використовувати в теорії надійності наведені в [6].

*Надійність* – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка в за-

лежності від призначення об'єкта та умов його застосування може включати безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність і збереженість або певні поєднання цих властивостей.

*Безвідмовність* – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання.

Імовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмов об'єкта не виникне.

Безвідмовність в тій чи іншій мірі властива об'єкту в будь-якому з можливих режимів його існування. В основному безвідмовність розглядається стосовно його використання за призначенням, але в багатьох випадках необхідна оцінка безвідмовності при зберіганні і транспортуванні об'єкта. Слід підкреслити, що показники безвідмовності вводяться або відносно до всіх можливих відмов об'єкта, або відносно до якого-небудь одного типу відмови із зазначенням критерію відмови.

*Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Об'єкт може перейти в граничний стан, залишаючись працездатним, якщо, наприклад, його подальше застосування за призначенням стане недопустимим з вимог безпеки, економічності та ефективності.

*Ремонтпридатність* – властивість об'єкта, що полягає в здатності до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту.

*Збереженість* – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатності об'єкта виконувати необхідні функції, протягом і після зберігання та (або) транспортування.

У процесі зберігання і транспортування об'єкти піддаються несприятливим впливам, наприклад, коливань температури, дії вологого повітря, вібраціям і т. В результаті після зберігання чи транспортування об'єкт може виявитися в непрацездатному і навіть у граничному стані. Збереженість об'єкта характеризується його здатністю протистояти негативному впливу умов і тривалості його зберігання і транспортування.

Залежно від умов і режимів застосування об'єкта вимоги до зберігання різні. Для деяких класів об'єктів може бути поставлена вимога, щоб після зберігання об'єкт знаходився в такому ж стані, як і до моменту початку зберігання. У цьому випадку об'єкт буде задовольняти вимогам безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності, що пред'являються до об'єкта до моменту початку зберігання.

У реальних умовах відбувається погіршення параметрів, які характеризують працездатність об'єкта, а також знижується його залишковий ресурс. В одних випадках достатньо, щоб після зберігання або транспортування об'єкт залишався в працездатному стані. У більшості інших випадків потрібно, щоб об'єкт зберігав достатній запас працездатності, тобто мав достатню безвідмовність після зберігання або транспортування.

У тих випадках, коли передбачена спеціальна підготовка об'єкта до застосування за призначенням після зберігання або транспортування, вимога про збереження працездатності замінюється вимогою, щоб технічні параметри об'єкта, які визначають його безвідмовність і довговічність, зберігалися в заданих межах.

Вимоги до показників безвідмовності, довговічності і ремонтоздатності для об'єкта, підданого тривалому зберіганню, повинні зазначатися у технічному завданні і в окремих випадках можуть бути знижені відносно рівня вимог на новий об'єкт, що не знаходився на зберіганні.

Слід розрізняти збереженість об'єкта до введення в експлуатацію та збереженість об'єкта в період експлуатації (при перервах в роботі). У другому випадку термін зберігання входить складовою частиною в термін служби.

Для кількісної оцінки показників надійності рекомендується використовувати характеристики, які наведені в таблиці 2.1 [7].

Таблиця 2.1 – Показники надійності, які рекомендовані для її кількісної оцінки

Показник	Поняття показника	Позначення показника
1	2	3
Безвідмовність	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Імовірність безвідмовної роботи (в заданому інтервалі часу);</li> <li>- Напрацювання на відмову або середній час безвідмовної роботи;</li> <li>- Інтенсивність відмов. Визначається ймовірністю відмови виробу, що не підлягає ремонту в одиницю часу;</li> <li>- Щільність ймовірності відмов;</li> <li>- Потік відмов, тобто середня кількість відмов ремонтіваних виробів в одиницю часу</li> </ul>	$P(\tau)$  $\tau_{cp}$  $\lambda(\tau)$  $a(\tau)$  $\omega(\tau)$
Довговічність	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ресурс - напрацювання виробу до граничного стану.</li> <li>- Розрізняють: приватний ресурс, середній ресурс, медіанний ресурс, міжремонтний ресурс;</li> <li>- <math>\gamma</math>-% ресурс, тобто ресурс, який має в середньому не менше <math>\gamma\%</math> об'єктів даного типу;</li> <li>- Термін служби, який на відміну від ресурсу визначається календарною тривалістю роботи до відмови</li> </ul>	$\tau_p$  $\tau_{p.ч.} \tau_{p.ср} \tau_{рм}$  $\tau_{p\gamma}$  $\tau_{ср.сл}$
Ремонтопридатність	- Середній час на відновлення (час простою)	$\tau_{восст}$
Збереженість	- Термін зберігання. Розрізняють медіанний і $\gamma\%$ термін служби	$\tau_{сохр}$



Зв'язок між ймовірністю безвідмовної роботи  $P(\tau)$  і ймовірністю відмови  $Q(\tau)$  може бути представлена виразом

$$P(\tau) = 1 - Q(\tau), \quad (2.1)$$

де значення  $P(\tau)$  і  $Q(\tau)$  лежать в межах від 0 до 1. Графічно ця залежність має вигляд (рис. 2.1).

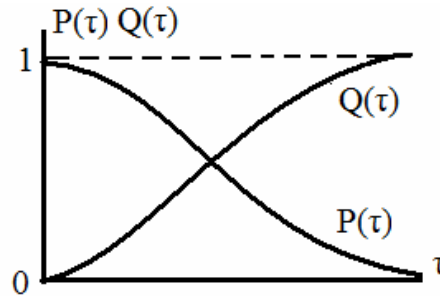


Рисунок 2.1 – Залежність між ймовірністю безвідмовної роботи  $P(\tau)$  і ймовірністю відмови  $Q(\tau)$

Частота відмов  $a(\tau)$  – це число відмов в одиницю часу, віднесене до первісного числа зразків виробу

$$\bar{a}(\tau) = \frac{\Delta n(\tau)}{n \cdot \Delta \tau}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta n(\tau)$  – число зразків виробу, які відмовили в інтервалі часу  $\Delta \tau$ ;  
 $n$  – число зразків виробу.

Частота відмов  $a(\tau)$  висловлює собою щільність ймовірності відмов  $f(\tau)$ .

$$a(\tau) = f(\tau) = \frac{dQ(\tau)}{d\tau} = -\frac{dP(\tau)}{d\tau} \quad (2.3)$$

$$\text{відповідно } Q(\tau) = \int_0^{\tau} f(\tau) \cdot d\tau \quad \text{або} \quad P(\tau) = 1 - \int_0^{\tau} f(\tau) \cdot d\tau \quad (2.4)$$

Інтенсивність відмов  $\lambda(\tau)$  – це відношення щільності ймовірності відмов  $f(\tau)$  до ймовірності відмов  $P(\tau)$ , тобто

$$\lambda(\tau) = \frac{f(\tau)}{P(\tau)} = \frac{a(\tau)}{P(\tau)} \quad (2.5)$$

Після інтегрування отримаємо

$$\int_0^{\tau} \lambda(\tau) \cdot d\tau = -\ln P(\tau), \quad \text{звідки} \quad P(\tau) = e^{-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) \cdot d\tau} \quad (2.6)$$

Виходячи з рівнянь 2.3, 2.5, 2.6 визначимо  $a(\tau)$

$$a(\tau) = f(\tau) = \lambda(\tau) \cdot P(\tau) = \lambda(\tau) \cdot e^{-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) \cdot d\tau} \quad (2.7)$$

При експоненційному законі розподілу відмов отримаємо

$$P(\tau) = e^{-\lambda \tau}, \quad Q(\tau) = 1 - e^{-\lambda \tau}, \quad a(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda \tau} \quad (2.8)$$

Якщо функція  $f(\tau)$  невідома, то

$$P(\tau) \approx \frac{N(\tau)}{n}, \quad (2.9)$$

де  $N(\tau)$  – число виробів, що залишилися працездатними до кінця напрацювання;  $n$  – число виробів.

Потік відмов  $\omega(\tau)$  можна виразити через математичне очікування числа відмов до напрацювання  $H(\tau)$ , тобто

$$\omega(\tau) = \frac{dH(\tau)}{d\tau}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } H(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\tau)}{n} \quad (2.11)$$

$m_i$  – число відмов  $i$ -го виробу.

Середній час безвідмовної роботи  $\tau_{cp}$  або напрацювання на відмову

$$\tau_{cp} = \int_0^{\infty} P(\tau) \cdot d\tau \quad (2.12)$$

Графічно величина  $\tau_{cp}$  визначається площею під кривою надійності  $P(\tau)$ .

Для оцінки довговічності використовують поняття середнього ресурсу і медіанного ресурсу

$$T_{p,cp} = \int \tau \cdot f(\tau) \cdot d\tau \quad (2.13)$$

$$T_{p,cp} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{pi} \quad (2.14)$$

$$T_{p,med} \text{ знаходять з умови: } \int_0^{T_{p,m}} f_p(\tau) \cdot d(\tau) = 0,5 \quad (2.15)$$

$$\gamma\text{-\% ресурс визначають з умов: } P(T_{p,\gamma}) = \int_{T_{p,\gamma}}^{\infty} f_p(\tau) \cdot d(\tau) = \gamma/100 \quad (2.16)$$

Середній термін служби

$$T_{cp,cl} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{cl}(\tau) \cdot d(\tau) \quad \text{або} \quad T_{cp,cl} \approx \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^n T_{cl_i} \quad (2.17)$$

Середній час відновлення

$$T_{voc} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{voc}(\tau) \cdot d\tau \quad \text{або} \quad T_{voc} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{voc_i}, \quad (2.18)$$

де  $T_{voc}$  – час витрачений на відновлення  $i$ -го виробу;

$n$  – число обслуговувань.

Термін зберігання

$$T_{\text{соxp}} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_{\text{соxp}}(\tau) \cdot d(\tau) \quad \text{або} \quad T_{\text{соxp}} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{соxp},i} \quad (2.19)$$

## 2.1 Терміни та визначення, що характеризують стан обладнання

Для оцінки стану обладнання рекомендується використовувати наступні визначення:

*Справний стан* – стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації.

*Несправний стан* – стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації.

*Працездатний стан* – стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації.

Працездатний об'єкт на відміну від справного повинен задовольняти лише тим вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації, виконання яких забезпечує нормальне використання об'єкта за призначенням. Працездатний об'єкт може бути несправним, наприклад, якщо він не задовольняє естетичним вимогам, причому погіршення зовнішнього вигляду об'єкта не перешкоджає його застосуванню по призначенню.

Для складних об'єктів можливі частково непрацездатні стану, при яких об'єкт здатний виконувати необхідні функції зі зниженими показниками або здатний виконувати лише частина необхідних функцій.

*Непрацездатний стан* – стан об'єкта, при якому значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації.

Перехід об'єкта з одного стану в інший зазвичай відбувається внаслідок пошкодження або відмови. З справного стану в несправний роботоспроможний стан перехід об'єкта відбувається через пошкодження.

*Граничний стан* – стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливо або недоцільно.

Перехід об'єкта в граничний стан тягне за собою тимчасове або остаточне припинення експлуатації об'єкта. При досягненні граничного стану об'єкт повинен бути знятий з експлуатації, спрямований в середній або капітальний ремонт, списаний, знищений або переданий для застосування не за призначенням. Якщо критерій граничного стану встановлений з міркувань безпеки зберігання або транспортування об'єкта, то при досягненні граничного стану зберігання чи транспортування об'єкта має бути припинено. В інших випадках при настанні граничного стану повинно бути припинено застосування об'єкта за призначенням.

Для об'єктів, що не підлягають ремонту має місце граничний стан двох видів. Перший вид збігається з непрацездатним станом. Другий вид граничного стану обумовлений тією обставиною, що починаючи з деякого моменту часу, подальша експлуатація ще працездатного об'єкта виявляється неприпустимою у

зв'язку з небезпекою або шкідливістю експлуатації. Перехід неремонтованого об'єкта в граничний стан другого виду відбувається до втрати об'єктом працездатності.

Для ремонтіваних об'єктів виділяють два або більше видів граничних станів. Наприклад, для двох видів граничних станів потрібно відправка об'єкта в середній або капітальний ремонт, тобто тимчасове припинення застосування об'єкта за призначенням. Третій вид граничного стану передбачає остаточне припинення застосування об'єкта за призначенням. Критерії граничного стану кожного виду встановлюються нормативно-технічні, конструкторські або експлуатаційні документації.

## **2.2 Дефекти, пошкодження, відмови устаткування**

В [8] рекомендується використовувати такі терміни, що характеризують порушення в роботі електротехнічного обладнання.

*Дефект* – кожна окрема невідповідність продукції встановленим вимогам.

*Пошкодження* – подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану.

*Відмова* – подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

Якщо працездатність об'єкта характеризують сукупністю значень деяких технічних параметрів, то ознакою виникнення відмови є вихід значення будь-якого з цих параметрів за межі допусків. Крім того в критерії відмов можуть входити також якісні ознаки, які вказують на порушення нормальної роботи об'єкта.

*Критерій відмови* – ознака або сукупність ознак порушення роботоспроможного стану об'єкта, які встановлені в нормативно-технічній або конструкторській документації.

*Причина відмови* – явища, процеси, події і стани, що викликали виникнення відмови об'єкта.

*Ресурсна відмова* – відмова, в результаті якого об'єкт досягає граничного стану.

*Незалежна відмова* – відмова, не обумовлена іншими відмовами.

*Раптова відмова* – відмова, що характеризується стрибкоподібною зміною значень одного або декількох параметрів об'єкта.

*Поступова відмова* – відмова, що виникає в результаті поступової зміни значень одного або декількох параметрів об'єкта.

Терміни «Раптова відмова» і «Поступова відмова» дозволяють розділяти відмови на дві категорії в залежності від можливості прогнозувати момент настання відмови. На відміну від раптової відмови, настанню поступової відмови передують безперервна і монотонна зміна одного або декількох параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати задані функції. Зважаючи на це вдається попередити наступ відмови або прийняти заходів щодо усунення її небажаних наслідків. Чіткої межі між раптовими і поступовими відмовами однак, провести не вдається. Механічні, фізичні та хімічні процеси, які складають причини відмов, як правило, протікають у часі досить повільно.

У міру вдосконалення розрахункових методів і засобів контрольно-вимірювальної техніки, що дозволяють своєчасно виявляти джерела можливих відмов і прогнозувати їх розвиток у часі, все більше число відмов буде відноситися до категорії поступових.

*Збій* – самоусуванні відмови або одноразова відмова, яка усувається незначним втручанням оператора.

Відмінною ознакою збою є те, що відновлення працездатного стану об'єкта може бути забезпечене без ремонту, наприклад, шляхом впливу оператора на органи управління.

*Прихована відмова* – відмова, що не виявляється візуально або штатними методами і засобами контролю та діагностування, але виявляється при проведенні технічного обслуговування або спеціальними методами.

*Конструктивна відмова* – відмова, що виникає з причини, пов'язаної з недосконалістю або порушенням встановлених правил або норм проектування і конструювання.

*Виробнича відмова* – відмова, що виникла з причини, пов'язаної з недосконалістю або порушенням встановленого процесу виготовлення або ремонту, виконуваного на ремонтному підприємстві.

*Експлуатаційна відмова* – відмова, що виникає з причини, пов'язаної з порушенням встановлених правил або умов експлуатації.

*Деградаційна відмова* – відмова, зумовлена природними процесами старіння, зношування, корозії і втоми при дотриманні всіх встановлених правил і норм проектування, виготовлення, експлуатації.

При аналізі надійності розрізняють ранні відмови, коли проявляється вплив дефектів, не виявлених в процесі виготовлення, випробувань або приймального контролю, і пізні, деградаційні відмови. Останні виникають на заключній стадії експлуатації об'єкта, коли внаслідок природних процесів старіння, зношування і т. п. об'єкт або його складові частини наближаються до граничного стану за умовами фізичного зношення. Імовірність виникнення деградаційних відмов у межах планованого повного або міжремонтного строку служби (ресурсу) повинна бути достатньо мала. Це забезпечується розрахунком на довговічність з урахуванням фізичної природи деградаційних відмов, а також належною системою технічного обслуговування і ремонту.

Розподіл відмов у часі можна представити залежністю (рис. 2.2).

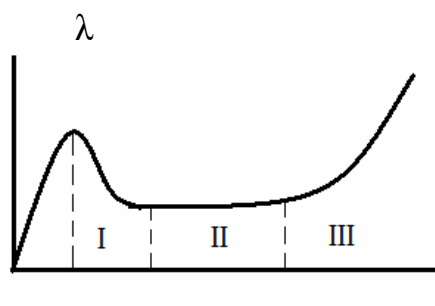


Рисунок 2.2 – Зміна інтенсивності відмов у часі

На даній залежності можна виділити три періоди:

**I період** –початковий стан експлуатації, де  $\lambda$  спочатку зростає, а потім зменшується. У цей період відбувається виявлення прихованих дефектів у виробих, які не були виявлені при випробуваннях і контролі.

**II період** – період нормальної експлуатації, де  $\lambda$  залишається практично постійною. На даному етапі можуть виникати критичні відмови, пов'язані з виникненням критичної концентрації навантажень, що перевищують запас міцності виробу.

Як математичні моделі розподілу ймовірностей критичних відмов застосовуються різні закони розподілу: нормальний закон розподілу, експоненційний, Вейбулловський,  $\gamma$ - розподіл, розподіл Пуассона та ін.

**III період** – період відмов зношування, де  $\lambda$  різко зростає з часом.

### 2.3 Тимчасові поняття

В процесі експлуатації для оцінки тривалості роботи обладнання можливо використовувати такі терміни.

*Напрацювання* – тривалість або обсяг роботи об'єкта.

Напрацювання об'єкта, що працює безперервно, можна вимірювати в одиницях календарного часу. Якщо об'єкт працює з перервами, то розрізняють неперервне і сумарне напрацювання. У цьому випадку напрацювання також можна міряти в одиницях часу. Для багатьох об'єктів фізичне зношування пов'язано не тільки з календарною тривалістю експлуатації, але і з обсягом роботи об'єкта, і тому залежить від інтенсивності застосування об'єкта за призначенням. Для таких об'єктів напрацювання зазвичай виражають через обсяг виробленої роботи або число робочих циклів.

*Ресурс* – сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Повний ресурс відраховують від початку експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, що відповідає остаточному припиненню експлуатації.

*Термін служби* – календарна тривалість експлуатації від початку експлуатації об'єкта або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби і термін зберігання вимірюють в одиницях часу. Співвідношення значень ресурсу і терміну служби залежить від інтенсивності використання об'єкта. Повний термін служби, як правило, включає тривалість всіх видів ремонту.

*Залишковий ресурс* – сумарне напрацювання об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан.

### 2.4 Показники надійності

*Показник надійності* - кількісна характеристика одної або декількох властивостей, складових надійності об'єкта.

Показники надійності вводять стосовно певних режимів та умов експлуатації, встановлених у нормативно-технічній або конструкторській документації.

На стадії проектування і конструювання показники надійності трактують як характеристики імовірнісних або напівімовірносних математичних моделей створюваних об'єктів. На стадіях експериментального відпрацювання, випробувань та експлуатації роль показників надійності виконують статистичні оцінки відповідних імовірнісних характеристик.

*Одиничний показник надійності* – показник надійності, який характеризує одну з властивостей, складових надійності об'єкта.

*Комплексний показник надійності* – показник надійності, який характеризує декілька властивостей, складових надійності об'єкта.

На відміну від одиничного показника надійності комплексний показник надійності кількісно характеризує не менше двох властивостей, складових надійностей, наприклад безвідмовність і ремонтпридатність. Прикладом комплексного показника надійності служить коефіцієнт готовності.

*Експериментальний показник надійності* – показник надійності, точкова або інтервальна оцінка якого визначається за даними випробувань.

*Експлуатаційний показник надійності* – показник надійності, точкова або інтервальна оцінка якого визначається за даними експлуатації.

*Екстрапольований показник надійності* – показник надійності, точкова або інтервальна оцінка якого визначається на підставі результатів розрахунків, випробувань і експлуатаційних даних шляхом екстраполяції на іншу тривалість експлуатації та інші умови експлуатації.

## **2.5 Комплексні показники надійності**

До комплексних показників надійності відносяться:

*Коефіцієнт готовності* – ймовірність того, що об'єкт виявиться в роботоспроможному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

*Коефіцієнт оперативної готовності* – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається, і, починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

*Коефіцієнт технічного використання* – відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані і простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період.

*Коефіцієнт збереження ефективності* – відношення значення показника ефективності використання об'єкта за призначенням за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, обчисленому за умови, що відмови об'єкта протягом тою ж періоду не виникають.

## **2.6 Нормування надійності**

*Нормування надійності* – встановлення в нормативно-технічній документації і (або) конструкторській документації кількісних і якісних вимог до надійності.

Нормування надійності включає вибір номенклатури нормованих показників надійності; техніко-економічне обґрунтування значень показників надійності об'єкта та його складових частин; завдання вимог до точності та достовірності вихідних даних; формулювання критеріїв відмов, пошкоджень і граничних станів; завдання вимог до методів контролю надійності на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

*Нормований показник надійності* – показник надійності, значення якого регламентовано нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією на об'єкт.

Як нормовані показники надійності можуть бути використані один або декілька показників, залежно від призначення об'єкта, ступені його відповідальності, умов експлуатації, наслідків можливих відмов, обмежень на витрати, а також від співвідношення витрат на забезпечення надійності об'єкта та витрат на його технічне обслуговування і ремонт. За погодженням між замовником і розробником допускається нормувати додаткові показники надійності, які не суперечать визначенню показників цього стандарту. Значення нормованих показників надійності враховують, зокрема, при призначенні ціни об'єкту, гарантійного терміну і гарантійного напруцювання.

## **2.7 Забезпечення, визначення та контроль надійності**

*Програма забезпечення надійності* – документ, що встановлює комплекс взаємопов'язаних організаційно-технічних вимог і заходів, що підлягають проведенню на певних стадіях життєвого циклу об'єкту і спрямованих на забезпечення заданих вимог до надійності або на підвищення надійності.

Дана програма може охоплювати весь життєвий цикл об'єкта або окремі його стадії. Вона включає, зокрема, програму експертного відпрацювання, яка визначає цілі, завдання, порядок проведення та необхідний обсяг випробувань або експериментального відпрацювання, а також регламентує порядок підтвердження показників надійності на стадії розробки.

Програма забезпечення ремонтпридатності встановлює комплекс взаємопов'язаних організаційно-технічних вимог і заходів, що направлені на забезпечення заданих вимог по ремонтпридатності. Ця програма розробляється одночасно з програмою забезпечення надійності та є або її складовою частиною, або самостійною програмою.

*Визначення надійності* – визначення чисельних значень показників надійності об'єкта.

*Контроль надійності* – перевірка відповідності об'єкта заданим вимогам до надійності.

*Розрахунковий метод визначення надійності* – метод, заснований на визначенні показників надійності за довідковими даними про надійність компонентів і комплектуючих елементів об'єкта, за даними про надійність



об'єкта, за даними про властивості матеріалів та іншої інформації, наявної до моменту оцінки надійності.

*Розрахунково-експериментальний метод визначення надійності* – метод, при якому показники надійності всіх або деяких складових частин об'єкту визначають за результатами випробувань і (або) експлуатації, а показники надійності об'єкта в цілому розраховують за математичної моделі.

*Експериментальний метод визначення надійності* – метод, заснований на статистичній обробці даних, які були одержані при випробуваннях або експлуатації об'єкту в цілому.

## **2.8 Випробування на надійність**

*Випробування на надійність* – випробування, яке проводиться для визначення показників надійності в заданих умовах.

Залежно від досліджуваних властивостей розрізняють випробування на безвідмовність, ремонтпридатність, збереженість і довговічність (ресурсні випробування).

*Визначальні випробування на надійність* – випробування, які проводяться для визначення показників надійності із заданими точністю та достовірністю.

*Контрольні випробування на надійність* – випробування, що проводяться для контролю показників надійності.

*Лабораторні випробування на надійність* – випробування, які проводяться в лабораторних або в заводських умовах.

*Експлуатаційні випробування на надійність* – випробування, які проводяться в умовах експлуатації об'єкта.

*Нормальні випробування на надійність* – лабораторні (стендові) випробування, методи та умови, проведення яких максимально наближені до експлуатаційних для об'єкта.

*Прискорені випробування на надійність* – лабораторні (стендові) випробування, методи та умови, проведення яких забезпечують отримання інформації про надійність в більш короткий термін, ніж при нормальних випробуваннях.

*План випробувань на надійність* – сукупність правил, який встановлює обсяг вибірки, порядок проведення випробувань, критерії їх завершення та прийняття рішень за результатами випробувань.

*Обсяг випробувань на надійність* – характеристика плану випробувань на надійність, що включає число випробовуваних зразків, сумарну тривалість випробувань в одиницях напруження і числа серій випробувань.

## **3. Рівняння «кривої життя» електричної ізоляції**

Дане рівняння є залежністю часу до руйнування твердої ізоляції від впливу різних факторів. Враховуючи різноманіття таких факторів, різний їх вплив на електричну ізоляцію, а також складність врахування їх взаємного впливу, при розробці рівняння, як правило, використовується ряд припущень, що дозволяють значно спростити дане рівняння, при незначному збільшенні похибки обчислення.

В [4] наведений один з варіантів рівняння «кривої життя» електричної ізоляції. Дане рівняння отримано на основі термофлюктуаційної теорії руйнування твердих тіл.

Відповідно до цієї теорії розрив зв'язків в матеріалі настає за умови, що теплова енергія буде дорівнювати або перевищувати енергію взаємодії атомів. Одночасно з розривом зв'язків відбувається і процес рекомбінації, тобто відновлення розірваних зв'язків. Коли на матеріал впливає тільки теплова енергія, між кількістю розірваних зв'язків в одиницю часу і кількістю рекомбінованих настає динамічна рівновага.

Під впливом на матеріал механічної сили енергія необхідна для розриву зв'язку зменшується, оскільки збільшується відстань між атомами і зменшується енергія взаємодії між ними. В результаті цього полегшується розрив зв'язку під дією теплової енергії і утруднюється рекомбінація розірваних зв'язків.

Енергія взаємодії між двома атомами описується потенціальною функцією Морзе

$$W(r) = D(e^{-2(r-R)/a} - 2e^{-(r-R)/a}) \quad (3.1)$$

де  $W(r)$  – енергія взаємодії між атомами;  $D$  – енергія дісоціації зв'язку;  $r$  – відстань між атомами;  $R$  – рівноважна відстань між атомами;  $a$  – постійний коефіцієнт, зумовлений коливаннями атомів.

При одночасній дії механічної розтягуючої напруги і електричного поля сила, яка діє у зв'язку, збільшується, що підвищує ймовірність її розриву.

Розрив зв'язків в ізоляції відбувається в області найбільшої місцевої напруженості електричного поля. При розриві одного зв'язку навантаження на сусідні зв'язки різко збільшується і відбувається їх руйнування. Таким чином, внаслідок перерозподілу навантаження через розрив одного зв'язку відбувається швидке руйнування ізоляції.

З курсу фізики відомо, що взаємодія атомів одного з одним може бути представлено графіком (рис. 3.1).

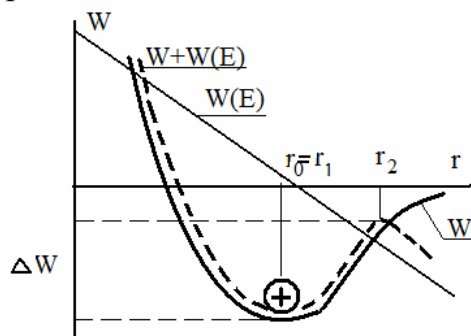


Рисунок 3.1 – Залежність енергії взаємодії атомів від відстані між ними

Тут:  $W$  – енергія взаємодії атомів;

$r_0 = r_1$  – відстань між атомами, що відповідає мінімуму потенціальної енергії, де сили взаємодії (тяжіння і відштовхування) рівні;

$\Delta W$  – висота потенційного бар'єру, який необхідно подолати атому при розриві хімічного зв'язку з урахуванням впливу навантаження  $E$ .

Під впливом зовнішнього поля  $E$  крива взаємодії змінюється і набуває вигляду кривої  $W + W(E)$ . Висота потенційного бар'єра при цьому зменшується. Однак вона ще досить велика, щоб атом міг її подолати. Отримати додаткову енергію атом може за рахунок теплових коливань (флуктуацій).

Приймаючи, що енергія розриву хімічного зв'язку  $D$  відповідає висоті потенційної ями, отримаємо

$$\Delta W = D \cdot \varphi(x), \quad (3.2)$$

де  $\varphi(x)$  – функція, яка описує зміну глибини потенційного бар'єру від величини і виду навантажень, що впливають

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right], \quad (3.3)$$

$$\text{де } x = \frac{1}{D} \sqrt{(Ae^{-bT} \cdot \beta \cdot \eta \cdot E)^2 + (\gamma \cdot \sigma)^2} \quad (3.4)$$

$A, \gamma$  – структурно чутливі коефіцієнти;

$b$  – коефіцієнт, що враховує зміну модуля пружності матеріалу при зміні температури;

$E$  – напруженість електричного поля, В;

$\sigma$  – механічна навантаження, Н / м;

$T$  – температура, °К;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує підвищення напруженості електричного поля за рахунок форми електродів;

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує підвищення напруженості електричного поля за рахунок неоднорідності структури.

$$E_{\max} = \eta \cdot \beta \cdot E_{\text{н\ddot{o}}} \quad (3.5)$$

З термодинаміки відомо, що час переходів атомів з одного стану в інший за рахунок теплових флуктуацій становить  $\tau_o \cong 10^{-13} \text{ сек}$ . Тоді частота теплових коливань атомів дорівнює  $1/\tau_o$ . Виходячи з цього, ймовірність розриву хімічного зв'язку в одиницю часу дорівнює

$$q = \frac{1}{\tau_o} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (3.6)$$

де  $q^* = e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}$  – ймовірність переходу через потенційний бар'єр при одному коливанні.

Підставляючи замість  $\Delta W$  енергію зв'язку  $D$  визначимо:

$$q = \frac{1}{\tau_o} e^{-\frac{D \cdot \varphi(x)}{kT}} \quad (3.7)$$

Умовою для розриву зв'язку є настання достовірної події. Відповідно до теорії ймовірності  $q \cdot \tau = 1$ , тоді час до розриву першого зв'язку дорівнює

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{D \cdot \varphi(x)}{2kT}} \quad (3.8)$$

Для рівномірного електричного поля можна прийняти, що  $\tau = \tau_{\text{проб}}$ .

Рівняння (3.8) є рівнянням «кривої життя» електричної ізоляції.

Розглянута модель має недоліки:

- не враховується старіння матеріалу з часом;
- складність визначення параметрів, що входять в рівняння;
- враховується розрив тільки одного зв'язку;
- допускається, що  $E$  і  $\sigma$  діють однаково.

На практиці для визначення  $\tau_{\text{пр}}$  використовують емпіричні рівняння:

- експоненціального виду:  $\tau_{\text{іо}} = \hat{A} \cdot \hat{a}^{-bE}$  де  $B$  і  $b$  коефіцієнти, які залежать від умов експерименту;

- ступеневого виду  $\tau_{\text{іо}} = A \cdot E^{-n}$  де  $A$  і  $n$  - постійні. Наприклад, для конденсаторного паперу на змінній напрузі значення  $n \approx 4-8$ , а на постійній напрузі  $n \approx 9-12$ .

- рівняння комбінованого виду  $\tau_{\text{іо}} = CU^{-n} \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}$ ,

де  $C$ ,  $n$  – константи;

$\Delta W$  – висота потенційного бар'єру;

$T$  – температура у  $^{\circ}\text{K}$ ;

$k$  – постійна Больцмана.

#### 4. Розрахунок часу до відмови твердої ізоляції

Час до відмови твердої ізоляції при постійно діючому навантаженні і заданій ймовірності безвідмовної роботи визначають з рівняння «кривої життя» електричної ізоляції (3.8).

У реальних умовах експлуатації крім постійних на електричну ізоляцію впливають також змінні і випадкові навантаження. Використовувати рівнянням "кривої життя" для визначення часу до відмови ізоляції при цих навантаженнях не можна. Однак, якщо припустити, що процес старіння ізоляції не впливає істотно на величину часу до її відмови, то можна знехтувати послідовністю їх впливу. Це дозволить враховувати вплив того чи іншого комплексу навантажень за розглянутий проміжок часу. Тоді умова відмови електричної ізоляції буде мати вигляд

$$\sum_{i=1}^{i=N} q_i \tau_i = 1 \quad (4.1)$$

де  $q_i$  – ймовірність відмови ізоляції в одиницю часу при дії на неї  $i$ -го комплексу навантажень  $E_i$ ,  $T_i$ ,  $\sigma_i$ ;  $\tau_i$  – тривалість  $i$ -го режиму роботи ізоляції.

Імовірність відмови ізоляції за одиницю часу при впливі і-го комплексу навантажень визначається з виразу

$$q = \frac{1}{\tau_o} e^{-D\phi(x)/2kT} \quad (4.2)$$

Час до відмови електричної ізоляції:

$$\sum_{i=1}^{i=N} \tau_i = \tau \quad (4.3)$$

Якщо в процесі експлуатації на ізоляцію діють постійні та змінні навантаження, умова відмови ізоляції має вигляд

$$\tau \sum_{i=1}^N q_i \frac{\tau_i}{\tau_i} = 1 \quad (4.4)$$

де  $\tau_i / \tau_i$  – відносна тривалість роботи ізоляції при і-му режимі за один цикл навантажень.

У зв'язку з тим, що більшість випадкових навантажень, який впливають на електричну ізоляцію, є безперервними (температура, механічних напруги і т.д.), то при розрахунках доцільно замінити їх дискретними значеннями. Для цього весь діапазон навантажень розбивають на інтервали, в яких безперервну величину замінюють середнім значенням

$$x_j = \frac{x_{jл} + x_{jп}}{2}$$

де  $x_{jп}$  і  $x_{jл}$  – значення випадкової величини на правій і лівій межах інтервалу.

Час дії  $x_j$  дорівнює

$$\tau_j = \tau [F(x_{jп}) - F(x_{jл})] \quad (4.5)$$

де  $\tau$  – загальна тривалість дії випадкової величини за один період експлуатації;  $F(x_{jп})$  і  $F(x_{jл})$  – функції розподілу ймовірностей навантаження на правій і лівій межах інтервалу, які можуть бути задані аналітично, графічно або в табличній формі.

## 5. Умови безвідмовної роботи ізоляцій

Застосування термофлюктуаційної теорії для опису пробою газоподібної і рідкої ізоляції можливо тільки в області великих напружень електричного поля і малому часу розвитку каналу розряду. Це дозволяє вважати, що напруга пробою не залежить від часу експлуатації.

В процесі експлуатації відмова газової і рідкої ізоляцій відбудеться, коли величина напруги діючого на ізоляцію буде дорівнювати або перевищувати її напругу пробою. Одним з таких варіантів буде вплив на ізоляцію перенапруг.

Перевищення амплітуди перенапруг над напругою пробою ізоляції є випадковою подією, вірогідність якої визначається за формулою

$$P = \int_0^{\infty} \phi(U_{\text{пер}}) dU_{\text{пер}} \int_0^{U_{\text{пер}}} f(U_{\text{пр}}) dU \quad (5.1)$$

де  $P$  – ймовірність пробою ізоляції при одному перенапруженні;

$f(U_{\text{пр}})$  – щільність розподілу ймовірності напруг пробою ізоляції;

$\phi(U_{\text{пер}})$  – щільність розподілу ймовірностей амплітуд перенапруг.

Ймовірність відсутності пробою ізоляції при впливі  $n$  перенапруг дорівнює  $P_n = (1 - P)^n$ .

Інтенсивність відмов газової і рідкої ізоляцій визначається за формулою

$$\lambda(\tau) = -\frac{\frac{dP(\tau)}{d\tau}}{P(\tau)} = -N * \ln(1 - P) \quad (5.2)$$

З цієї формули випливає, що відмови газової і рідкої ізоляцій відповідають експоненціальному закону, при якому інтенсивність відмов не залежить від часу.

Розглянемо фактори, які впливають на величину напруги пробою газової, рідкої і твердої ізоляцій.

Як електричну ізоляцію застосовується повітря, двох- і трьохатомні гази (азот, водень, вуглекислий газ), а також високоміцні гази. Достатньо високі діелектричні властивості, такі як низька провідність ( $\gamma \approx 10^{-15}$  1/ Ом • м), незначні діелектричні втрати ( $\text{tg}\delta \approx 10^{-6}$ ), а також здатність самовідновлювати електричну міцність після пробою, відкривають можливості для використання газів в якості зовнішньої ізоляції повітряних ліній електропередачі та внутрішньої ізоляції силових кабелів і конденсаторів, високовольної апаратури розподільчих пристроїв.

Застосовувані в електроізоляційних конструкціях високоміцні гази повинні відповідати таким вимогам: мати високу електричну міцність і стійкість до дії коронних розрядів, мати низьку температуру скраплення, бути хімічно інертними до матеріалів, з якими контактують, а також бути нетоксичними. Електрична міцність деяких газоподібних діелектриків наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Електрична міцність газоподібних діелектриків

Найменування газу	Хімічний склад	Молекулярна маса	Температура кипіння, С°	Відносна $E_{пр}$ ( $E_{пр\ газу}/E_{пр\ повітря}$ )
Гелій	He	4	-268,8	0,06
Водень	H <sub>2</sub>	2	-252,6	0,6
Вуглекислий газ	CO <sub>2</sub>	44	-78,3	0,9
Азот	N <sub>2</sub>	28	-195,6	1,0
Фреон	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	129	-30	2,4
Елегаз	SF <sub>6</sub>	146	-63,8	2,9
Гексафторціклобутан	C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	162	-5	3,9
Деклафторціклопентан	C <sub>5</sub> F <sub>10</sub>	250	22	6,3
Перфторфенантрен	C <sub>14</sub> F <sub>24</sub>	624	205	10,0

До переваг газоподібних діелектриків, які містять фтор в порівнянні з рідкими діелектриками слід віднести більш високу нагрівостійкість, стійкість до старіння і значно меншу щільність. З відомих високоміцних газів найбільш повно зазначеним вимогам відповідають елегаз (SF<sub>6</sub>) і фреон (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>).

Елегаз хімічно інертний, не має запаху, його нагрівостійкість становить 800°С. Цей газ не розкладається під дією води, кислот, кисню та ін. Його електрична міцність при нормальному тиску в 2,9 рази вища, ніж у повітря.

Фреон має істотний недолік, який полягає в тому, що під впливом електричних розрядів, його молекули розпадаються на компоненти, які за наявності вологи, викликають корозію металів. Крім того, при низькій температурі цей газ перетворюється в рідину.

Пробивна напруга газів залежить від їх складу, температури, тиску, відстані між електродами і ступеня неоднорідності електричного поля. Функція розподілу ймовірностей напруг пробою газів відповідає нормальному закону

$$f(U_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(U_p - \bar{U}_p)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (5.3)$$

де  $f(U_p)$  – щільність розподілу ймовірностей пробивних напруг;  $\bar{U}_p$  – математичне сподівання пробивної напруги;  $\sigma_p$  – середньоквадратичне відхилення напруги пробою;  $U_p$  – випадкова величина напруги пробою.

$$\bar{U}_{i\bar{o}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{i\bar{o}}}{N} \quad (5.4)$$

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення пробивної напруги

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (U_{i\bar{o}} - \bar{U}_{i\bar{o}})^2}{N-1}} \quad (5.5)$$

Основними факторами, які впливають на величину напруги пробою, є температура, тиск газу і його вологість. В процесі експлуатації зміна цих факторів носить випадковий характер, що приводить до збільшення розсіювання напруги пробою газів.

В однорідному електричному полі напруга пробою повітря може бути визначено за формулами

$$\overline{U_p} = 2,38\delta L + 2,48\sqrt{\delta L} \quad (5.6)$$

$$\overline{U_p} = 2,46\delta L + 2,11\sqrt{\delta L} \quad (5.7)$$

де  $L$  – відстань між електродами;  $\delta$  – відносна щільність повітря.

$$\delta = \frac{289 \cdot 10^{-5} \cdot P}{273 + T} \quad (5.8)$$

де  $T$  – температура, °C;  $P$  – тиск, Па.

При нормальних умовах  $\delta = 1$ .

Формула (5.6) застосовується при відстані між електродами до 160 мм, (5.7) – до 120 мм.

Залежність електричної міцності газів від тиску представлена на рисунку 5.1.

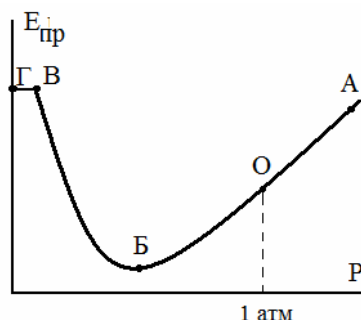


Рисунок 5.1 – Залежність електричної міцності газів від тиску

При підвищенні тиску вище нормального (ділянка ОА) електрична міцність зростає, що пов'язано зі зменшенням довжини вільного пробігу електрона і відповідно його додаткової енергії, яку він отримує під впливом електричного поля. Зменшення тиску нижче нормального (ділянка ОБ) супроводжується збільшенням довжини вільного пробігу електронів і його додаткової енергії.

На ділянці БОА напруга пробою дорівнює

$$U_{пр} = U_{пр0} \cdot \delta \quad (5.8)$$

де  $U_{пр}$  – напруга пробою повітря при даних температурах і тиску;  $U_{пр0}$  – напруга пробою повітря при  $T = 20^\circ\text{C}$  і  $P = 0,1$  МПа;  $\delta$  – відносна щільність повітря.

В області високого вакууму (ділянка БВ) електрична міцність зростає у зв'язку зі зменшенням кількості молекул в одиниці об'єму та відповідно зменшенням вірогідності зіткнення їх з електронами. При високому вакуумі (ділянка ВГ) електрична міцність досягає значень порядку  $10^2$  МВ / м і залишається практично незмінною.



Відповідно до закону Пашена в однорідному електричному полі напруга пробою є функцією множення тиску газу на відстань між електродами (рис. 5.2).

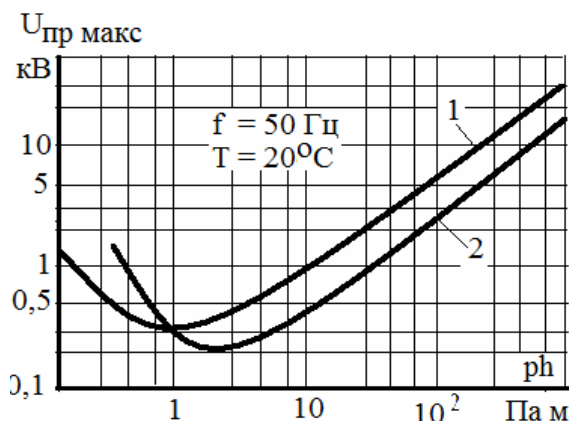


Рисунок 5.2 – Залежність напруги пробою  $U_{\text{пр макс}}$  повітря (1) і неону (2) від множення тиску газу на відстань між електродами

Характерні криві залежності  $U_{\text{пр}}$  від величини множення  $ph$  дозволяють визначити мінімальну величину напруги пробою для даного газу, яка, як правило, відповідає розрядженим газам. Як показали експериментальні дослідження для газів, що містять двох- і багатоатомні молекули величина напруги пробою знаходиться в межах 280-420 В. У інертних газів, які містять одноатомні молекули, напруга пробою нища. Наприклад, у аргону  $U_{\text{пр}} \approx 195$  В, у неону з парами натрію  $U_{\text{пр}} \approx 85$  В.

При значеннях  $ph > 3 \text{ Па} \cdot \text{м}$  залежність  $U_{\text{пр}} = f(ph)$  набуває лінійного характеру. Використовувати дану залежність для визначення  $U_{\text{пр}}$  можливо до тисків, що не перевищують 2,0 МПа. Вище цього значення похибка у визначенні  $U_{\text{пр}}$  перевищує 10%.

При високому тиску ( $> 2,0 \text{ МПа}$ ) на величину електричної міцності газів впливає матеріал електродів і ступінь обробки їх поверхні. При нормальному тиску ступінь обробки практично не впливає на  $E_{\text{пр}}$  повітря. Однак, при високому тиску величина  $E_{\text{пр}}$  повітря залежно від ступеня обробки електродів може змінитися в два рази.

В однорідному електричному полі електрична міцність газів залежить від відстані між електродами, а також їх форми. Графік залежності електричної міцності повітря від відстані між електродами в однорідному електричному полі наведено на рисунку 5.3.

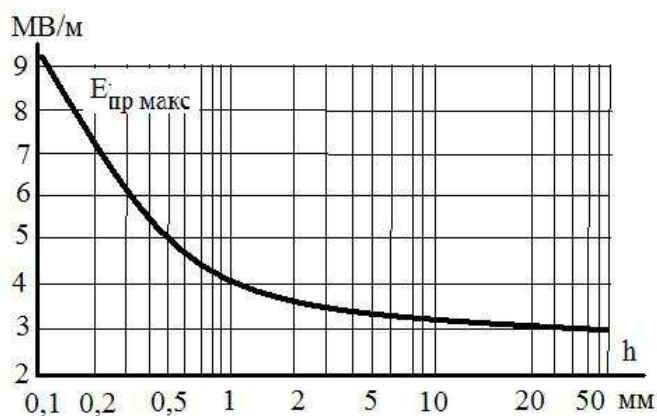


Рисунок 5.3 – Залежність  $E_{пр} = f(h)$  для повітря

Характерною особливістю даної залежності є збільшення  $E_{пр}$  при зменшенні відстані між електродами. Пояснюється це труднощами формування розряду при зменшенні відстані між електродами в зв'язку зі зменшенням довжини вільного пробігу електронів. При  $h = 0,005$  мм електрична міцність повітря досягає значення  $70$  МВ / м.

У реальних електроізоляційних конструкціях однорідне електричне поле зустрічається рідко, в зв'язку з цим розглянемо деякі особливості пробою газів в неоднорідному полі. Таке поле виникає між електродами типу вістря і площини, два вістря, двома сферами, при відстані між ними, що перевищує радіус сфер, проводами і т.д. Загальний вигляд залежностей  $E_{пр} = f(p)$ ,  $E_{пр} = f(h)$ ,  $U_{пр} = f(ph)$  в неоднорідному електричному полі зберігається таким же як і в однорідному полі. Однак, величина електричної міцності газів в неоднорідному полі нижча ніж в однорідному. Причому, чим більша ступінь неоднорідності, тим нижче електрична міцність газу. Особливістю даного пробою є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місці, де напруженість електричного поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони у іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

При цьому в газах спостерігається ефект полярності, який полягає в тому, що величина напруги пробою залежить від полярності напруги, що підводиться (рис. 5.4).

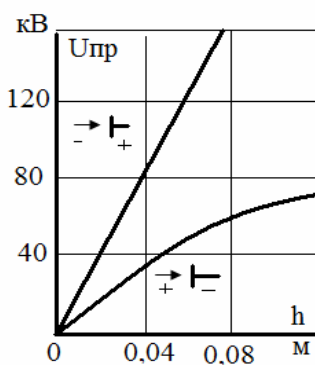


Рисунок 5.4 – Залежність  $U_{пр} = f(h)$  для неоднорідного електричного поля

При рівних умовах для несиметричних електродів голка-площина пробивна напруга при позитивній полярності вістря значно нижче, ніж при негатив-

ною. Цей ефект викликаний тим, що в неоднорідному електричному полі в місці найбільшої неоднорідності, тобто поблизу вістря виникають позитивні об'ємні заряди. Ці заряди створюють електричне поле, напруженість якого при позитивній полярності вістря спрямована згідно з напруженістю зовнішнього електричного поля. Внаслідок цього результуюча напруженість електричного поля збільшується, і пробій настає при меншій напрузі. При негативній полярності вістря, поле просторового позитивного заряду частково компенсує зовнішнє електричне поле, і тому пробивна напруга більша.

На величину  $U_{пр}$  газових діелектриків в неоднорідному електричному полі впливає вологість. При підвищенні вологості напруга пробою, як правило, зростає. Пояснюється це тим, що молекули води мають підвищену здатність захоплювати вільні електрони. Внаслідок цього утворюються малорухливі негативні іони. Кількість електронів в міжелектродному проміжку зменшується, що і приводить до збільшення напруги пробою.

При нормальних умовах ретельно очищені рідкі діелектрики мають електричну міцність більшу практично на порядок, ніж у газів. В однорідному електричному полі електрична міцність деякі нафтових масел і органічних рідин, особливо які містять атоми фтору або хлору, наближається до значень, які мають тверді діелектрики.

Існує кілька різних теорій пробою рідких діелектриків. Проте повною мірою пояснити механізм пробою рідких діелектриків вони не в змозі. Найбільш повно розроблені теорії теплового і електричного пробоїв. Причому вплив електричних і теплових процесів на механізм пробою підтверджується експериментальними даними.

Теорія теплового пробою рідких діелектриків пояснює механізм пробою наявністю навіть в очищених діелектриках деякої кількості домішок. Це можуть бути волокна паперу, мікрочастинки води, емульсій та ін. За відсутності електричного поля домішки рівномірно розподілені в об'ємі діелектрика. Під дією електричного поля частинки домішок починають накопичуватися в місцях з найбільшою напруженістю поля, утворюючи при цьому ланцюжки, що з'єднують електроди. Домішки мають значно більше значення відносної діелектричної проникності, ніж рідкі діелектрики. Наприклад, у води значення відносної діелектричної проникності знаходиться в межах 82-85, у той час як у нафтового масла близько 2,2. Присутність домішок призводить до збільшення неоднорідності електричного поля. Ланцюжки, які утворюються з домішок мають підвищену електропровідність. Час утворення таких ланцюжків не перевищує однієї секунди. Протікання струму ланцюжками викликає їх нагрівання до високої температури, під дією якої відбувається перехід домішок в газоподібний стан і утворення газових мікроканалів. По цих каналах і відбувається пробій, механізм якого аналогічний пробою газових діелектриків.

Існуюча теорія електричного пробою розроблена для рідких діелектриків повністю очищених від домішок. Виникнення розрядного каналу пояснюється холодною емісією електронів з катода, в результаті якої виникає ударна і фотоіонізація нейтральних молекул. Внаслідок більшої щільності рідких діелектриків довжина вільного пробігу електронів в них менша і для накопичення ними

енергії необхідної для іонізації потрібна велика напруженість електричного поля. Для «ідеальних» рідких діелектриків передбачається, що їх електрична міцність буде в стільки разів більшою електричної міцності повітря, у скільки разів довжина вільного пробігу електрона в рідині менша ніж у повітрі. Так, електрична міцність повітря  $E_{пр} \approx 3,2$  МВ/м, а електрична міцність деяких очищених рідких діелектриків може досягати значень  $E_{пр} \approx 400$  МВ/м.

На електричну міцність технічних рідких діелектриків, які застосовуються в електроенергетиці, в основному впливає хімічний склад самого діелектрика, а також концентрація і склад домішки.

Для нафтових електроізоляційних масел характерна лінійна залежність електричної міцності від щільності рідини (рис. 5.5).

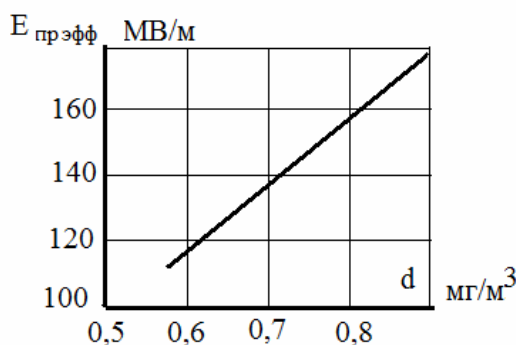


Рисунок 5.5 – Залежність електричної міцності нафтового ізоляційного масла від щільності

На величину електричної міцності рідких діелектриків значний вплив має полярність рідини. Зі збільшенням  $\epsilon_r$  електрична міцність, як на постійній, так і змінній напрузі зменшується. Причиною цього є збільшення діелектричних втрат при зростанні  $\epsilon_r$ , що збільшує ймовірність виникнення теплового пробою.

Істотний вплив на електричну міцність рідких діелектриків мають різного роду домішки і забруднення, які можуть потрапляти в них в реальних умовах експлуатації. Особливо слід відзначити вплив вологи, яка потрапляє в діелектрик в результаті його контактування з навколишнім повітрям, а також в процесі старіння масел при термоокисній деструкції. Вода у вигляді емульсії, діаметр крапель якої не перевищує 10 мкм потрапляючи в рідкий діелектрик, різко знижує його електричну міцність. Залежність напруги пробою трансформаторного масла від процентного складу в ньому води наведена на рисунку 5.6.

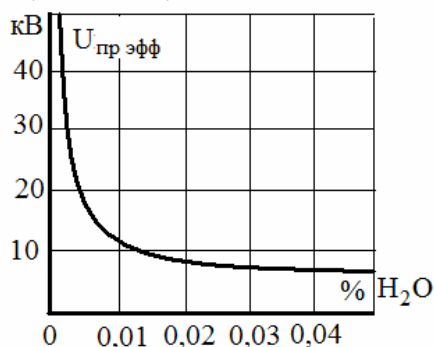


Рисунок 5.6 – Залежність напруги пробою трансформаторного масла від процентного складу в ньому води при відстані між електродами  $h = 2,5$  мм

Краплі води, сильнополярної рідини, під дією електричного поля утворюють ланцюжки між електродами, які мають підвищену електропровідність в порівнянні з маслом. Згодом цими ланцюжками і розвивається пробій.

Істотно зменшується електрична міцність трансформаторного масла, якщо крім вологи в ньому містяться волокна ізоляції. Маючи гігроскопічні властивості, волокна вбирають вологу і під дією електричного поля розташовуються в ланцюжки, що з'єднують електроди. Навіть незначна кількість такого забруднення різко зменшує величину напруги пробою.

Крім зазначених забруднень в процесі експлуатації в рідкі діелектрики потрапляють частинки металу, сажі, а також колоїдні частинки, що супроводжується збільшенням неоднорідності електричного поля і зменшенням електричної міцності.

Застосовувані в електроенергетиці рідкі діелектрики, як правило, мають не високу робочу температуру. Так, робоча температура трансформаторних масел не повинна перевищувати  $95^{\circ}\text{C}$ . Вище цієї температури властивості масел погіршуються внаслідок окислювальних процесів і його електрична міцність зменшується. На рис 5.7 наведено залежності напруги пробою висушеного трансформаторного масла (крива 1) і трансформаторного масла, яке в процесі експлуатації адсорбувало вологу з навколишнього середовища (крива 2).

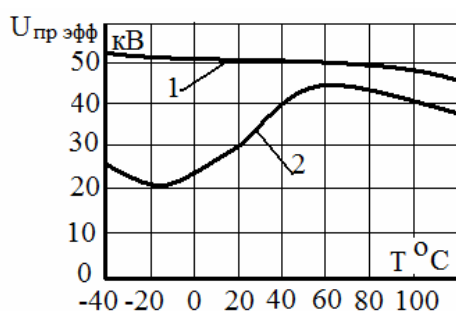


Рисунок 5.7 – Залежність  $U_{\text{пр еф}}$  нафтового трансформаторного масла від температури:

1 – висушене масло; 2 – трансформаторне масло, що містить вологу

З наведених залежностей видно, що напруга пробою сухого масла практично не змінюється до температури  $80^{\circ}\text{C}$ . При подальшому підвищенні температури починається кипіння легких рідких фракцій і виникнення бульбашок газу, в яких виникають іонізаційні діелектричні втрати. Електричне поле стає неоднорідним і  $U_{\text{пр}}$  зменшується.

Зволожене масло має мінімум в кривій залежності  $U_{\text{пр}} = f(T)$  при  $T = -8^{\circ}\text{C}$ , тому, що в результаті великої різниці в значеннях відносних діелектричних проникностей води і масла виникає сильно неоднорідне поле. Подальше зменшення температури супроводжується зменшенням  $\epsilon_r$ . Електричне поле стає більш однорідним і напруга пробою зростає.

При підвищенні температури вище  $0^{\circ}\text{C}$  краплі води починають розчинятися в маслі, електричне поле стає більш однорідним і  $U_{\text{пр}}$  зростає. Зменшення  $U_{\text{пр}}$  при  $T > 80^{\circ}\text{C}$  відбувається з тих же причин, що і в сухому маслі.

Для твердих діелектриків характерні наступні види пробою: електричний, електротепловий і електрохімічний. Крім зазначених видів в твердих діелектриках можуть мати місце електромеханічний, іонізаційний та інші види пробою. На відміну від газових і рідких діелектриків, тверді діелектрики не в змозі відновлювати електричну міцність після зняття прикладеної до них напруги і підлягають заміні. Залежно від стану діелектрика, а також впливу зовнішніх факторів в одному і тому ж діелектрику можуть виникати той чи інший вид пробою.

Електричний пробій це електронний процес, коли з небагатьох початкових електронів у твердому діелектрику виникає електронна лавина і між електродами утворюється розрядний канал у вигляді плазми.

Відповідно до теорії А. А. Воробьова, електрична міцність діелектриків збільшується зі зростанням енергії кристалічної решітки. В рівномірному електричному полі вільні електрони, появі яких сприяє автоелектронна емісія, прискорюються і, стикаючись з вузлами кристалічної решітки, віддають їм накопичену енергію. Електрони, які досягли критичної швидкості, починають відщеплювати нові електрони і стаціонарний стан порушується внаслідок виникнення ударної іонізації. У процесі ударної іонізації при взаємодії носіїв зарядів з електронами відбувається порушення хімічних зв'язків і перехід твердої речовини у стан частково іонізованої газової плазми, яка поширюється в напрямку потоку носіїв заряду. Потенціал заряду виноситься в головну частину каналу. Процес далі йде до тих пір, поки канал не перетне відстань між електродами.

Чисто електричний пробій має місце, коли виключено вплив електропровідності і діелектричних втрат, а також відсутня іонізація газових включень. Цей вид пробою протікає практично миттєво за час  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с.

У реальних умовах експлуатації електричний пробій має місце внаслідок попадання в електроустановки грозових розрядів або виникнення комутаційних перенапруг.

Більшість технічних діелектриків відрізняється неоднорідністю структури. Наявність в них включень з підвищеною провідністю і діелектричною проникністю призводить до спотворення електричного поля, внаслідок чого всередині діелектрика виникають ділянки з підвищеною провідністю. Це призводить до зменшення електричної міцності неоднорідних діелектриків.

У сильно неоднорідному електричному полі в твердих діелектриках може мати місце ефект полярності, причому менша пробивна напруга відповідає позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни. Незважаючи на те, що в твердих діелектриках ефект полярності виражений слабкіше, ніж в газоподібних, відмінність пробивних напруг може досягати 20-30%.

Низькою електричною міцністю відрізняються пористі діелектрики. Наприклад, непропитаний папір, дерево, кераміка і т.д. З метою підвищення електричної міцності проводиться їх просочення або покриття спеціальними складами, що обмежують доступ вологи всередину діелектрика.

Тепловий пробій твердих діелектриків виникає в тому випадку, коли кількість теплової енергії, що виділяється в діелектрику внаслідок діелектричних втрат, стійко перевищить ту кількість енергії, яку діелектрик здатний передати

в навколишнє середовище. Необмежене зростання температури закінчується тепловим руйнуванням діелектрика. Таким чином, тепловим пробоем називається пробій, зумовлений порушенням теплової рівноваги діелектрика внаслідок діелектричних втрат.

Пробій, як правило, відбувається в тому місці діелектрика, де умови відведення тепла найгірші, тому величина  $E_{пр}$  залежить від властивостей того середовища, в якій знаходиться діелектрик. З ростом температури навколишнього середовища його електрична міцність зменшується, що пов'язано зі збільшенням кількості енергії, що виділяється в діелектрику в результаті діелектричних втрат і зменшенням кількості енергії, яку діелектрик здатний відводити в навколишнє середовище (рис. 5.8).

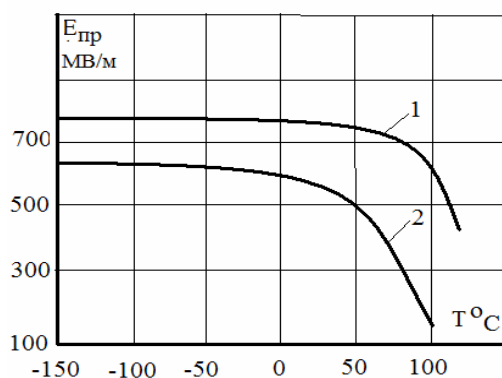


Рисунок 5.8 – Залежності електричної міцності твердих діелектриків від температури:  
1 – полістирол, 2 – поліетилен

При пробії товстих зразків тепловідвід від внутрішніх областей погіршується, тому вони перегріті більше, і в результаті цього в міру збільшення товщини зразків  $E_{пр}$  зменшується (рис. 5.9).

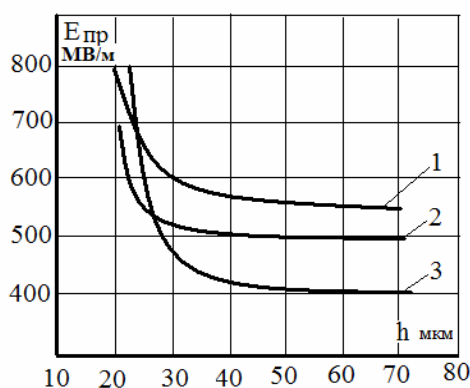


Рисунок 5.9 – Залежність електричної міцності твердого діелектрика від товщини зразка:  
1 – поліпропілен, 2 – полістирол, 3 – поліетилен

Зменшення  $E_{пр}$  спостерігається також при тривалій витримці зразка під напругою, тому що діелектрик за цей час нагрівається більше за рахунок діелектричних втрат.

Різновидом теплового пробою можна вважати іонізаційний пробій. Він характерний для неоднорідних діелектриків, що містять включення з низькою електричною міцністю, наприклад, газові включення. Таке включення можна представити у вигляді елементарного конденсатора, на обкладках якого при прикладенні зовнішнього поля починає накопичуватися заряд. У зв'язку з тим, що діелектрична проникність включення завжди менше значення проникності навколишнього матеріалу, у перерізі діелектрика відбувається перерозподіл напруженості поля, який призводить до збільшення напруженості у включенні. Навіть при помірній напрузі, прикладеній до діелектрика, напруженість у включенні може досягти величини, достатньої для виникнення іонізаційного процесу, що призводить до розряду. Пробій газового або рідкого включення діелектрика називається частковим розрядом.

В результаті іонізаційних втрат розігрівається поверхня закритих пор, виникають локальні перепади температури і пов'язані з ними термомеханічні напруги. Це може привести до розтріскування діелектрика.

Електрохімічний пробій спостерігається при постійній і змінній напрузі низької частоти, коли електричне поле викликає незворотні зміни електроізоляційного матеріалу. Внаслідок цього зменшується електричний опір доти, поки не наступить пробій. Даний процес називається електрохімічним старінням матеріалу. Розрізняють такі види старіння твердих діелектриків: природне, яке викликане впливом на діелектрик навколишньої температури, кисню, озону, ультрафіолетових променів і т.д. ; електричне, викликане впливом на діелектрик як змінної, так і постійної напруги. В результаті електричного старіння в твердих діелектриках утворюються електричні або металеві дендриди.

Для розвитку електрохімічного пробою потрібен тривалий час, тому що він пов'язаний з процесом електропровідності. Пробій може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, що супроводжується тепловим ефектом і відновленням, наприклад в кераміці, окислів металів змінної валентності.

При підвищенні температури і вологості навколишнього середовища ймовірність виникнення електрохімічного пробою збільшується.

Поверхневий пробій є пробоем рідини чи газу поблизу поверхні твердого діелектрика. У разі поверхневого пробою електрична міцність твердого діелектрика не порушується, проте виникнення провідного каналу на поверхні істотно обмежує робочу напругу ізолятора.

Чим сильніше виражені гідрофільні властивості діелектрика, тим значніше зменшується поверхнева пробивна напруга, особливо в умовах підвищеної вологості.

Значення поверхневого пробивної напруги багато в чому залежить від конфігурації електродів, габаритних розмірів і форми твердого діелектрика. Коли діелектрик експлуатується на повітрі, то напруга поверхневого пробою залежить від температури, тиску, відносної вологості повітря і частоти прикладеної напруги.

Для запобігання поверхневого пробою доцільно збільшувати довжину розрядного шляху уздовж поверхні твердого діелектрика. З цією метою створю-



ють ребристі поверхні ізоляторів, виконуються проточки різних канавок, виготовляються конструкції з "утопленими" електродами. Підвищення робочих напруг досягається також згладжуванням неоднорідностей електричного поля за рахунок зміни форми електродів або оптимізації конструкції ізолятора. Аналогічний ефект може бути отриманий при нанесенні на поверхню ізолятора напівпровідникових покриттів або діелектричних плівок з підвищеною діелектричною проникністю.

Ефективним заходом боротьби з поверхневим пробоем є заміна повітря рідким діелектриком. Підвищена в порівнянні з повітрям діелектрична проникність рідин сприяє зниженню напруженості поля на поверхні твердого діелектрика, що дозволяє підвищити робочу напругу.

#### Контрольні питання

1. Назвіть гази, які використовуються як електрична ізоляція.
2. Опишіть процес пробою газів в однорідному електричному полі і вкажіть фактори, які впливають на величину напруги пробою.
3. Опишіть процес пробою газів в неоднорідному електричному полі і вкажіть основні закономірності його розвитку.
4. Наведіть приклади зміни величини напруги пробою від тиску газу і відстані між електродами.
5. Опишіть процес пробою технічних рідких діелектриків.
6. Вкажіть фактори, які впливають на електричну міцність рідких діелектриків.
7. Перерахуйте основні механізми пробою твердих діелектриків.
8. Опишіть закономірності розвитку електротеплового пробою.
9. Наведіть приклади зміни електричної міцності твердих діелектриків від температури.
10. Опишіть закономірності електрохімічного пробою твердих діелектриків.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27905.1 – 88 Системы электрической изоляции электрооборудования.
2. ГОСТ 8865 – 93 Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.
3. ГОСТ 1515.3 – 96 Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 кВ до 750 кВ.
4. Дмитриевский В.С. Расчёт и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
5. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
6. ГОСТ 27.002 – 89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
7. Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 156 с.
8. ГОСТ 15467 Управление качеством продукции. Основные термины и определения.

*Навчальне видання*

**ГАРЯЖА** Василь Миколайович  
**ВОРОПАЙ** Валентина Григорівна  
**ДЬЯКОВ** Євген Дмитрович

Конспект лекцій  
з курсу  
**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Розділ  
**«ЕЛЕКТРИЧНА ІЗОЛЯЦІЯ»**

*(для студентів 2-3 курсів денної та заочної форм навчання  
напрямів підготовки 6.05070 1–Електротехніка та електротехнології,  
6.050702 – Електромеханіка та слухачів другої вищої освіти)*

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерний набір *Є. Д. Дьяков*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2014, поз. 96Л

---

Підп. до друку 27.01.2015  
Друк на ризографі  
Зам. №

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 2,5  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.